

考虑温度作用的钢管混凝土系杆拱桥徐变效应

祁强

(平凉职业技术学院建筑工程系, 甘肃 平凉 744000)

摘要:为研究考虑温度作用的钢管混凝土系杆拱桥徐变效应,以1-128 m 钢管混凝土拱桥为实例,建立有限元三维计算模型,按照张戎令提出的含钢率、核心混凝土强度、温度三者共同作用下钢管混凝土的徐变模型开展徐变对钢管混凝土系杆拱桥长期变形和内力的影响分析。研究表明:拱肋徐变会导致钢管混凝土系杆拱桥的拱肋和系梁产生下挠变形,拱肋发生应力重分布,致使拱肋钢管应力不断增大,核心混凝土应力不断减小;考虑温度作用下拱肋徐变引起的拱肋、系梁下挠和拱肋应力重分布大于不考虑温度作用下拱肋徐变影响值。因此,在桥梁设计、施工监控以及后期使用阶段应考虑温度对徐变的影响,以便能合理预测运营阶段长期徐变变形和应力重分布。

关键词: 钢管混凝土; 徐变; 温度; 含钢率

中图分类号: U448.22⁺5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)07-0058-05

在外部力的作用下,钢管混凝土通过钢管对核心混凝土的约束(套箍)效应,使核心混凝土呈现三向受压状态,显著增强了其抗压强度及变形能力。同时,当混凝土填充于钢管内部后,因混凝土与钢管之间的紧密贴合,有效提升了钢管的抗屈曲性能^[1]。这种钢管与混凝土的优化组合,不仅相互弥补了各自的不足,而且充分发挥了二者的强度承载能力。目前,该组合结构已被广泛应用于大跨度房屋结构、桥梁及地铁工程中。

钢管混凝土徐变现象是钢管混凝土结构设计过程中必须予以高度重视的核心议题之一。在持续荷载作用下,核心混凝土因徐变效应而发生变形,这一变形进而引发钢管混凝土结构内部的应力重新分布。随着这一过程的发展,核心混凝土将经历持续的卸载过程,而钢管的应力则逐渐增加。这种应力转移可能导致钢管提前进入屈服阶段,从而缩短钢管混凝土结构的预期使用寿命。

祁强和张思远^[2]通过大气温度试验箱模拟了西北大温差环境,研究了钢管混凝土构件温度场分布,得出温度对钢管与核心混凝土构件黏结力的影响规律;徐杰和杨正华^[3]利用有限元模型研究了不考虑温度下大跨度钢管混凝土拱桥徐变规律分析;刘栋^[4]利用有限元模型研究了考虑施工步骤对钢管混凝土徐变的影响;安海平^[5]对比分析了不考虑温度作用下的4种徐变预测模型对钢管混凝土拱桥线型和力学性能的研究;罗靛等^[6]通过有限元模拟分析了方钢管混

凝土短柱的力学性能;张戎令等^[7]、祁强和张思远^[8]研究了不同膨胀剂掺量、应力比以及不同含钢率的钢管混凝土试件进行了长期轴压荷载作用下的钢管混凝土徐变试验,并对《公路钢管混凝土拱桥设计规范》(JTJ/T D65-06—2015)^[9]给的徐变模型按照B3模型^[10]进行了修正,得到了考虑含钢率、核心混凝土强度、温度的钢管混凝土构件徐变模型。

纵观上述,虽然钢管混凝土构件在徐变方面取得了较大的进展,且学者提出了考虑温度的钢管混凝土构件徐变模型,但在实际桥梁中的应用却很少。为此,本文以某高速铁路大跨简支钢管混凝土系杆拱桥为例,使用学者提出的考虑温度钢管混凝土徐变模型,利用有限元软件开展数值仿真分析,进行徐变对钢管混凝土系杆拱桥的变形和内力的影响分析,给出考虑温度状况下徐变效应对系杆拱桥的挠度和内力的影响规律,以期为此类桥梁工程提供实践参考。

1 工程实例

以一座1-128 m 钢管混凝土系杆拱桥为例(图1)。该桥位于乌鲁木齐燕儿窝地区,该桥的上部是一孔的简支系杆拱桥,桥长是128 m 铁路客运双线铁路桥(图2),最高设计车速为350 km/h,拱肋间距为13.8 m,拱轴线采用二次抛物线: $Y = 0.8X - 0.00625X^2$,矢跨比 $f/L = 1/5$ 。拱肋分两步完成:架设空钢管拱肋、顶升C50混凝土。该桥所处环境月平均温度如图3所示。

收稿日期: 2024-08-24

作者简介: 祁强(1993—),男,甘肃平凉人,硕士,讲师,研究方向为干寒地区材料与结构耐久性、系杆拱桥力学性能。



图 1 1-128 m 系杆拱桥现场

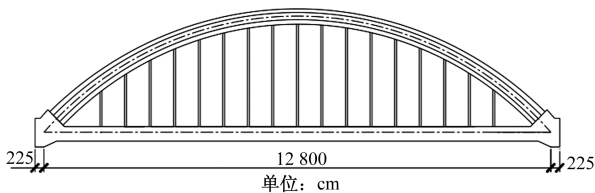


图 2 1-128 m 系杆拱桥整体布置

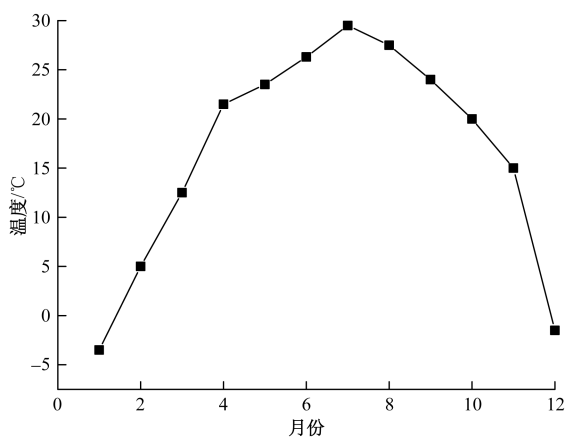


图 3 新疆地区月平均温度

2 有限元模型及徐变模型选取

2.1 有限元模型建立

采用 Midas/Civil 桥梁结构有限元软件仿真模拟施工过程,用梁单元模拟拱肋和系梁,用桁架单元模拟吊杆单元,拱肋单元用施工联合见面模拟施工过程。为满足模型的精度,整个模型共建 481 个梁

$$\varphi'(t_T, \tau_T) = \left[1 + \frac{1 - R/R_0}{0.46 (h/h_0)^{1/3}} \right] \frac{5.3}{(f_{cm}/f_{cm0})^{0.5}} \times \frac{1}{0.1 + (\tau_T/\tau_{0,T})^{0.2}} \times \left(\frac{(t_T - \tau_T)/\tau_{0,T}}{\left\{ 150 \left[1 + \left(1.2 \frac{RH}{RH_0} \right)^{18} \right] \frac{h}{h_0} + 250 \right\} + (t_T - \tau_T)/\tau_{0,T}} \right)^{0.3} \quad (2)$$

式中: R 为环境年平均相对湿度, R_0 取值为 100%; h 为构件的理论厚度,mm, h_0 取值为 100 mm; f_{cm} 为混凝土 28 d 抗压强度标准值, f_{cm0} 取值为 10 MPa; ρ 为参数, $\rho = \frac{1}{1 - e^{-\varphi'(t_T, \tau_T)}} - \frac{1}{\varphi'(t_T, \tau_T)}$; $\tau_{0,T}$ 为参数, $\tau_{0,T} = \int_0^{\tau_0} \beta_T(\tau) d\tau$, τ_0 取值为 1 d; h 为构件理论厚度; E_s 、 E_c 分别为钢管和混凝土的弹性模量; α_s 为

单元,68 个桁架单元。按 15 d、1 个月、2 个月、4 个月、7 个月、1 年、2 年、4 年、7 年、10 年模拟成桥后桥梁徐变变形。采用 Midas/civil 有限元软件建立的有限元模型如图 4 所示。建模用材料见表 1。

表 1 建模用材料

编号	结构	型号	弹性模量/(kN·mm ⁻²)
1	系梁混凝土	C55	3.60×10 ¹
2	拱肋混凝土	C50	3.55×10 ¹
3	预应力钢绞线	1860 钢管绞线	1.95×10 ²
4	吊杆	1670 钢丝	2.05×10 ²
5	拱肋钢管	Q335	2.06×10 ²
6	横撑、缀板	Q235	2.06×10 ²

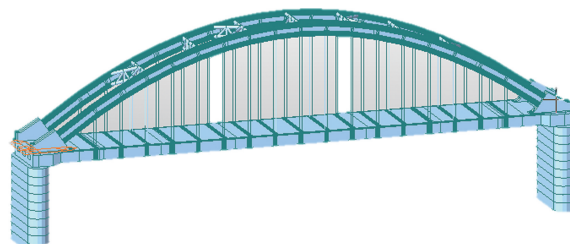


图 4 1-128 m 系杆拱桥有限元模型

2.2 徐变模型选取

在考虑温度时,拱肋采用张戎令等^[11]提出的考虑温度钢管混凝土构件徐变模型,见式(1),系梁徐变选用的徐变模型为《公路桥涵钢筋及预应力混凝土设计规范》(JTG 3362—2014)徐变模型^[12]。该桥于 3 月底完成了拱肋浇筑,因此拱肋徐变温度从 4 月份开始计算,以后温度按照时间顺序依次类推。

$$\varphi(t, \tau, T) = R_T \varphi_0(t_T, \tau_T, T) = \frac{\varphi'(t_T, \tau_T)}{1 + \frac{E_s}{E_c} [1 + \rho \varphi'(t_T, \tau_T)] \alpha_s} \quad (1)$$

式中: $\varphi(t, \tau, T)$ 为 α_s 、 f_{cm} 、 T 共同作用下的钢管混凝土徐变系数; t_T 、 τ_T 分别为考虑温度的混凝土等效计算龄期、考虑温度的混凝土等效加载龄期。

截面含钢率。

2.3 有限元模型验证

为了验证计算模型、模型参数选取及考虑温度效应的钢管混凝土徐变模型的合理性,将徐变作用下各截面位置的拱肋应力和拱肋位移计算值与桥梁监控实测数据进行对比分析。表 2 为成桥 4 个月时计算值与实测值对比。

表 2 成桥 4 个月计算值与实测值对比

截面位置	项目	实测值	计算值	
			考虑温度	不考虑温度
L/2	钢管上缘应力/MPa	87.48	83.97	81.03
	钢管下缘应力/MPa	40.19	38.64	37.05
	上弦杆混凝土应力/MPa	5.72	5.81	6.19
	下弦杆混凝土应力/MPa	2.65	2.72	2.88
	拱肋位移/mm	66.21	63.78	61.30
L/4	拱肋位移/mm	42.05	40.38	39.13

注:L 为系梁长度。

经过对表 2 数据的分析对比,关于该桥在建成后的 4 个月内的拱顶截面数据呈现以下趋势:拱顶截面的挠度实测值为 66.21 mm,考虑温度变化的计算挠度为 63.78 mm,差异为 3.7%,而不考虑温度变化的计算挠度为 61.3 mm,差异为 7.4%。在应力方面,拱顶截面钢管上缘的实测应力为 87.48 MPa,考虑温度变化的计算应力为 83.97 MPa,差异为 4.0%,而不考虑温度变化的计算应力为 81.03 MPa,差异为 7.4%。同样地,钢管下缘的实测应力为 40.19 MPa,考虑温度变化的计算应力为 38.64 MPa,差异为 3.9%,而不考虑温度变化的计算应力为 37.05 MPa,差异为 7.8%。对于上弦杆混凝土,实测应力为 5.72 MPa,考虑温度变化的计算应力为 5.81 MPa,差异为 1.6%,而未考虑温度变化的计算应力为 6.19 MPa,差异为 8.2%。下弦杆混凝土的实测应力为 2.65 MPa,考虑温度变化的计算应力为 2.72 MPa,差异为 2.6%,而未考虑温度变化的计算应力为 2.88 MPa,差异为 8.7%。此外,对于 L/4 拱跨截面,其实测挠度为 42.05 mm,考虑温度变化的计算挠度为 40.38 mm,差异为 4.0%,而不考虑温度变化的计算挠度为 39.13 mm,差异为 6.9%。考虑温度后徐变引起的应力和变形计算值与实测误差在 4% 以内,不考虑温度因素徐变引起的应力和变形计算值与实测误差最小值为 6.9%。因此,本文的有限元模型和考虑温度的徐变模型设置合理。

3 钢管混凝土系杆拱桥性能分析

3.1 对拱肋线形的影响

图 5 与图 6 分别呈现了拱顶截面及 L/4 截面处的徐变位移曲线。经由对图 5 的深入分析,可明确得出以下结论:在考虑温度作用与不考虑温度作用两种情况下,拱顶徐变挠度均随时间推移而逐渐增大,且两者均呈现早期徐变变形显著、后期趋于平缓的趋势。具体而言,在考虑温度作用时,钢管混凝土系杆拱桥在成桥后的第 1 年、第 2 年、第 4 年、

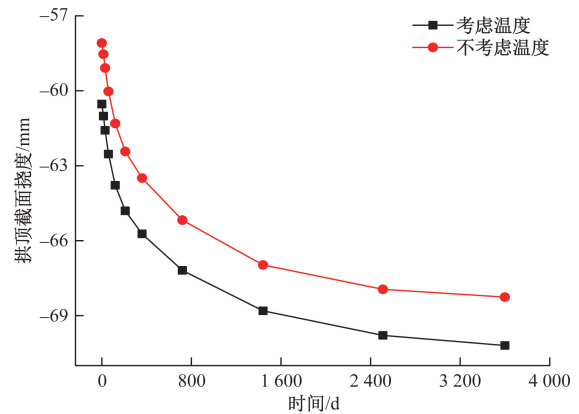


图 5 拱顶截面变形曲线

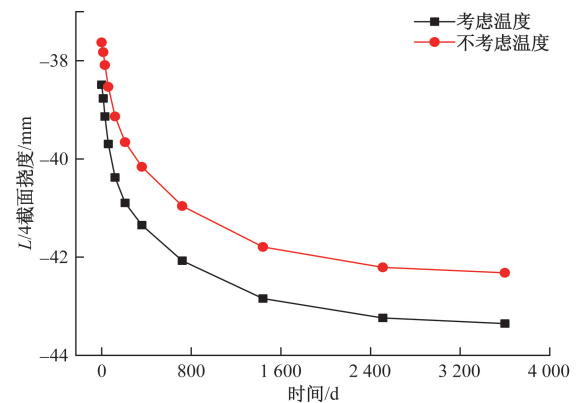


图 6 L/4 截面变形曲线

第 7 年和第 10 年,其拱顶挠度分别为 -85.468、-87.002、-88.706、-89.737、-90.157 mm;而在不考虑温度作用时,相应时间点的挠度分别为 -83.366、-85.126、-86.992、-87.991、-88.297 mm。两者之间的差值分别为 2.5%、2.2%、2.0%、2.0%和 2.1%。

同样,由图 6 可知,L/4 拱肋截面的徐变挠度与拱顶徐变挠度呈现相似的变化趋势。在考虑温度作用时,钢管混凝土系杆拱桥在成桥后的第 1 年、第 2 年、第 4 年、第 7 年和第 10 年,其 L/4 拱肋截面的挠度分别为 -41.346、-42.073、-42.842、-43.238、-43.352 mm;而在不考虑温度作用时,相应时间点的挠度分别为 -40.159、-40.959、-41.791、-42.208、-42.318 mm。两者之间的差值分别为 3.0%、2.4%、2.5%、2.4%和 2.4%。

3.2 对系梁线形的影响

图 7 和图 8 分别为系梁跨中截面和 L/4 截面挠度位移曲线。分析可得,考虑温度作用和不考虑温度作用下,系梁截面挠度都随时间推移而增大,而且两者都是早期徐变变形明显,后期趋于平缓,与拱肋挠度变形有相同的规律。由图 7 可看出,考虑

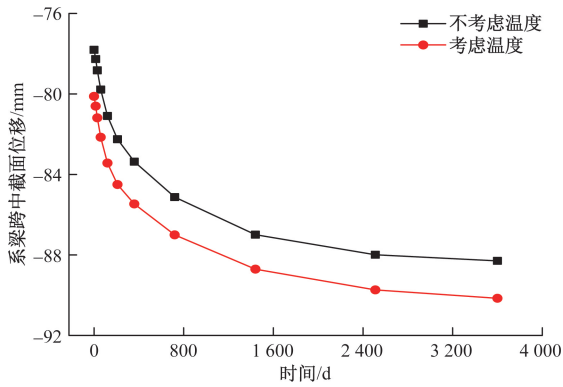


图 7 跨中截面系梁变形曲线

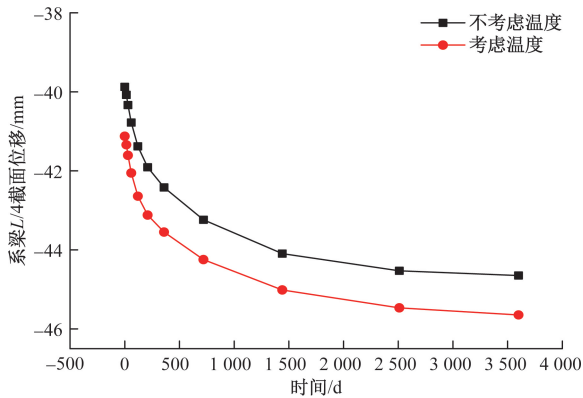


图 8 L/4 截面系梁变形曲线

温度作用下从成桥阶段到成桥 10 年,跨中截面系梁挠度增加了 13.5%;不考虑温度作用下从成桥阶段到成桥 10 年,跨中截面系梁挠度增加了 13.7%。成桥 10 年后,考虑温度与不考虑温度下跨中截面系梁挠度分别为 90.135、88.297 mm,两者相差 2.1%。由图 8 可看出,考虑温度作用下从成桥阶段到成桥 10 年,L/4 截面系梁挠度增加 12.2%;不考虑温度作用下从成桥阶段到成桥 10 年,跨中截面系梁挠度增加了 11.9%。成桥 10 年后,考虑温度与不考虑温度下跨中截面系梁挠度分别为 -45.646、-44.648 mm,两者相差 2.2%。

从上述分析可看出,考虑温度和不考虑温度作用下徐变挠度计算结果有明显的差异,从成桥到成桥 10 年拱肋徐变对拱肋的位移和系梁的位移差距都在 2% 以上,因此温度对徐变的影响不应忽视,在设计 and 施工阶段都应考虑温度对徐变的影响。

3.3 拱肋截面应力重分布

图 9~图 12 表明,在成桥后的不同时间段内,考虑温度作用与不考虑温度作用下的应力存在显著差异。具体而言,成桥 1 年后至 10 年期间,两者之间的应力差异百分比分别为 6.1%、5.9%、5.7%、-5.6% 和 5.7%。同样地,在成桥后相同的

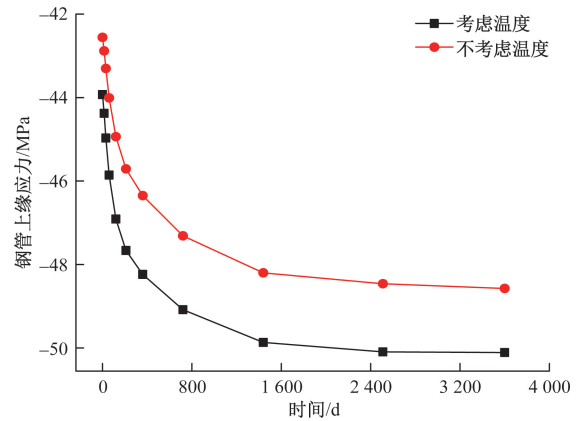


图 9 拱脚截面钢管上缘应力

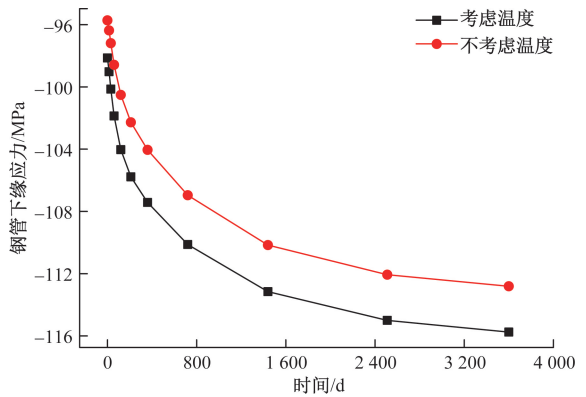


图 10 拱脚截面钢管下缘应力

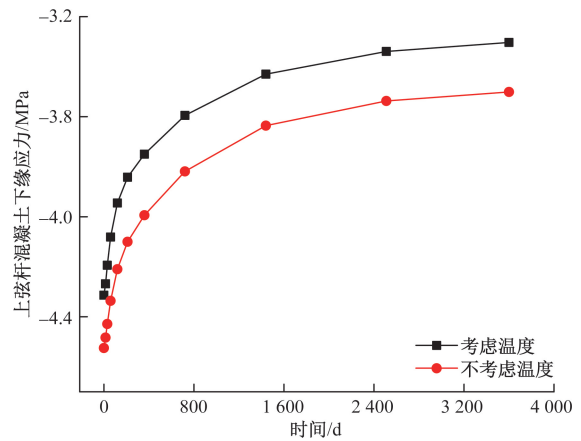


图 11 拱脚截面上弦杆混凝土上缘应力

时间段内,拱脚截面下弦杆混凝土下缘的应力差异百分比分别为 5.8%、5.7%、-5.6%、-5.6% 和 -5.6%。

在不考虑温度作用的情况下,拱脚截面钢管上缘的应力从初始的 42.559 MPa 逐渐增加,至 10 年后达到 48.575 MPa,增幅为 14.1%。钢管下缘的应力也从初始的 95.73 MPa 逐步增加,至 10 年后为 112.809 MPa,增幅达到 17.8%。而上弦杆混凝土上缘的应力则呈现下降趋势,从初始的 4.525 MPa 减小至 10 年后的

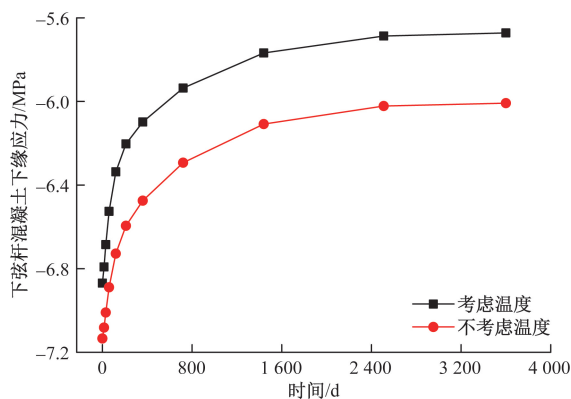


图 12 拱脚截面下弦杆混凝土下缘应力

3.501 MPa, 减小幅度为 22.6%。下弦杆混凝土下缘的应力也呈现类似的下降趋势, 从初始的 95.73 MPa 减小至 10 年后的 6.008 MPa, 减小幅度为 15.8%。

在考虑温度作用的情况下, 拱脚截面钢管上缘的应力从初始的 43.931 MPa 增加至 10 年后的 50.111 MPa, 增幅为 14.1%。钢管下缘的应力则从初始的 98.146 MPa 增加至 10 年后的 115.753 MPa, 增幅达到 17.9%。而上弦杆混凝土上缘的应力从初始的 4.314 MPa 减小至 10 年后的 3.303 MPa, 减小幅度为 23.4%。下弦杆混凝土下缘的应力从初始的 6.869 MPa 减小至 10 年后的 5.672 MPa, 减小幅度为 17.4%。

以上数据表明, 温度作用对桥梁拱脚截面的应力变化具有显著影响, 且在不同时间段内, 应力的增加或减少幅度呈现一定的规律性。这为桥梁的长期监测和维护提供了重要的参考依据。

4 结论

随时间推移, 拱肋徐变会导致钢管混凝土系杆拱桥的拱肋和系梁产生下挠变形, 拱肋发生应力重分布, 致使拱肋钢管应力不断增大, 核心混凝土应力不断减小。考虑温度作用下拱肋徐变引起的拱肋、

系梁下挠和拱肋应力重分布大于不考虑温度作用下拱肋徐变影响值。在桥梁设计、施工监控以及后期使用阶段应考虑温度对徐变的影响, 以便能合理预测运营阶段长期徐变变形和应力重分布。

参考文献

- [1] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥[M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [2] 祁强, 张思远. 西北大温差地区钢管混凝土构件温度场及脱粘分析[J]. 科技和产业, 2024, 24(5): 260-264.
- [3] 徐杰, 杨正华. 大跨简支铁路钢管混凝土拱桥徐变效应研究[J]. 西安工业大学学报, 2023, 43(2): 133-139.
- [4] 刘栋. 考虑施工步骤收缩徐变因素的钢管混凝土拱桥线形控制研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2023, 21(2): 143-148.
- [5] 安海平. 不同标准中徐变模式对钢管混凝土拱桥静力性能的影响[J]. 中国标准化, 2022(24): 222-228.
- [6] 罗靓, 潘志成, 吕辉. 方钢管约束钢筋混凝土柱拟静力有限元分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(14): 5877-5885.
- [7] 张戎令, 王起才, 马丽娜, 等. 膨胀剂掺量和含钢率对钢管混凝土徐变性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(5): 749-756.
- [8] 祁强, 张思远. 考虑温度效应的钢管混凝土轴压构件徐变模型预测[J]. 四川建筑科学研究, 2024, 50(4): 26-32.
- [9] 公路钢管混凝土拱桥设计规范: JTG/T D65-06—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [10] BAZANT Z P, BAWEJA S. Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures: Model B3[J]. Materials and Structures, 1995, 28(6): 357-365.
- [11] 张戎令, 郝兆峰, 祁强, 等. 考虑温度变化的钢管混凝土徐变试验研究及预测模型[J]. 材料导报, 2021, 35(20): 20028-20034.
- [12] 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG 3362—2014[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.

Creep Effect of Concrete-filled Steel Tube Tied Arch Bridge Considering Temperature Action

QI Qiang

(Department of Architectural Engineering, Pingliang Vocational and Technical College, Pingliang 744000, Gansu, China)

Abstract: In order to study the creep effect of concrete-filled steel tube tied arch bridge, taking 1-128 m concrete-filled steel tube arch bridge as an example, a three-dimensional finite element calculation model was established. According to the creep model of concrete-filled steel tube under the action of steel content, core concrete strength and temperature proposed by Jung Ling Chang, the influence of creep on the long-term deformation and internal force of concrete-filled steel tube tied arch bridge was analyzed. The results show that the arch rib creep will cause the arch rib and tie beam of the concrete-filled steel tube tie arch bridge to produce flexural deformation, and the arch rib stress will redistribute, resulting in the arch rib stress increasing and the core concrete stress decreasing. The stress redistribution of arch rib, girder and arch rib caused by the creep of arch rib under the consideration of temperature is greater than that without the consideration of temperature. The influence of temperature on creep should be considered in bridge design, construction monitoring and later use stage, so as to reasonably predict long-term creep deformation and stress redistribution during operation stage.

Keywords: concrete-filled steel tube; creep; temperature; steel content